

Arcul electric în echipamentele de comutație

1.Generalități

Întreruperea unui circuit electric parcurs de curent este însoțită de un **arc electric** care se dezvoltă între contactele echipamentelor de comutație. Prezența arcului electric este necesară deoarece, dacă nu ar exista arc electric la deconectare, energia înmagazinată în câmpul magnetic al sistemului s-ar transforma în energie electrică ce ar avea ca efect apariția unor supratensiuni la bornele echipamentelor de comutație. Prin arc electric o parte din energie se disipă sub formă de energie calorică. Arcul electric apare și la închiderea circuitului, dar acesta se anulează rapid datorită vitezei mari de închidere a contactelor.

Arcul electric poate fi asimilat unui conductor mobil care se deplasează sub influența câmpului magnetic sau a unui jet de gaz.

Arcul electric este o descărcare autonomă cu tendință de automenținere caracterizat prin:

- ✓ densitate mare de curent ;
- ✓ temperatură înaltă ;
- ✓ presiune mare a gazului;
- ✓ cădere de tensiune redusă pe coloana de arc.

Caracteristica principală a descărcării în gaz este proprietatea gazului în general izolant, de a deveni conductor electric. Conductibilitatea este determinată de densitatea purtătorilor de sarcină liberi și de viteza de deplasare spre cei doi electrozi (cele 2 contacte) și variază cu densitatea, temperatura și natura mediului și cu valoarea intensității câmpului electric.

Sursele de ionizare în arc electric sunt :

- **Ionizarea prin șoc** care depinde de : presiunea și densitatea gazului, tensiunea de ionizare a gazului din spațiul de arc;
- **Emisia autoelectronică** produsă de un câmp electric intens aflat în fața catodului;
- **Termoionizarea** - procesul de ionizare în coloana de arc depinde în foarte mare măsură de temperatura înaltă a gazului. Termoionizarea este cea care contribuie major la menținerea și dezvoltarea arcului electric .

- **Fotoionizarea.**

Concomitent cu **fenomenul de ionizare** au loc fenomene de deionizare (recombinare a particulelor încărcate) a canalului de arc, fenomene care contribuie la stingerea arcului electric, moment după care urmează fenomenul de restabilire a tensiunii între contactele deschise ale aparatului.

Arcul electric de curent alternativ format la deschiderea contactelor prin contribuția fenomenelor de ionizare, se menține pînă la trecerea prin zero a curentului când energia din arc scade. Prin urmare pentru **stingerea arcului electric** se impune prezența unor **dispozitive de stingere**, care să intensifice fenomenul de deionizare a coloanei de arc și să producă răcirea bruscă a arcului electric, încât aceasta să se stingă la trecerea naturală prin zero a curentului.

Fenomenul de recombinare depinde de mediul de stingere folosit (mediul în care se dezvoltă arcul electric) :

- natura gazului
 - temperatura gazului (temperatura mai mică intensitatea recombinației mai mare) ;
 - presiunea gazului (cu cât presiunea este mai mare recombinația este mai mare) ;
 - secțiunea arcului (cu cât secțiunea este mai mică, recombinația este mai intensă) ;
 - gradientul curentului electric (cu cât gradientul este mai mic cu atât viteza de deplasare a particulelor încărcate este mai mică, deci recombinația este mai intensă).

2.Arcul electric de curent continuu

2.1. Caracteristici de funcționare

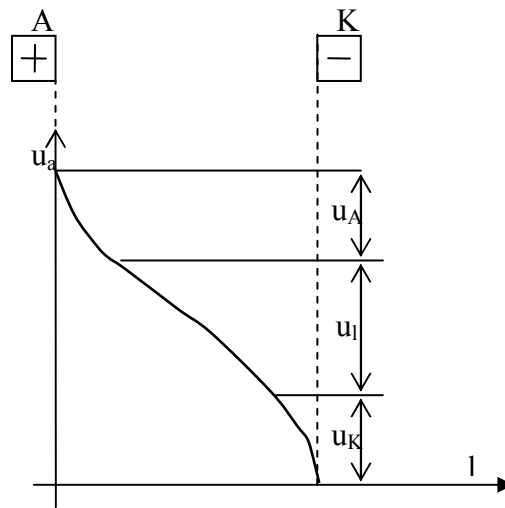
În figura de mai jos este prezentată variația căderii de tensiune pe arcul electric dezvoltat între doi electrozi A și K alimentați în curent continuu, unde u_A este *căderea de tensiune anodică*, u_K *căderea de tensiune catodică*, u_l este *căderea de tensiune pe coloana de arc*. În coloana arcului electric de curent continuu există valori locale extrem de variabile ale intensității câmpului electric

Se fac următoarele observații:

a) în fața catodului, intensitatea mare a câmpului electric determină, pe o distanță relativ mică de ordinul parcursului liber mediu, o diferență de potențial $u_K = 30V$;

b) $u_A < u_K$

c) coloana arcului se comportă cvasineutru, cu o intensitate a câmpului electric relativ mică; valoarea aceasta depinde de condițiile de răcire ale arcului electric (presiune, suflaj magnetic).



Dependența căderii de tensiune funcție de curent reprezintă **caracteristica** arcului, sau **legea lui Ayrton**:

$$u = A + \frac{B}{i},$$

unde $A = a + b \cdot l$, $B = c + d \cdot l$, unde $a [V]$, $b [V/m]$, $c [VA]$, $d [VA/m]$ sunt constante de material.

În literatura de specialitate se recomandă și alte dependențe:

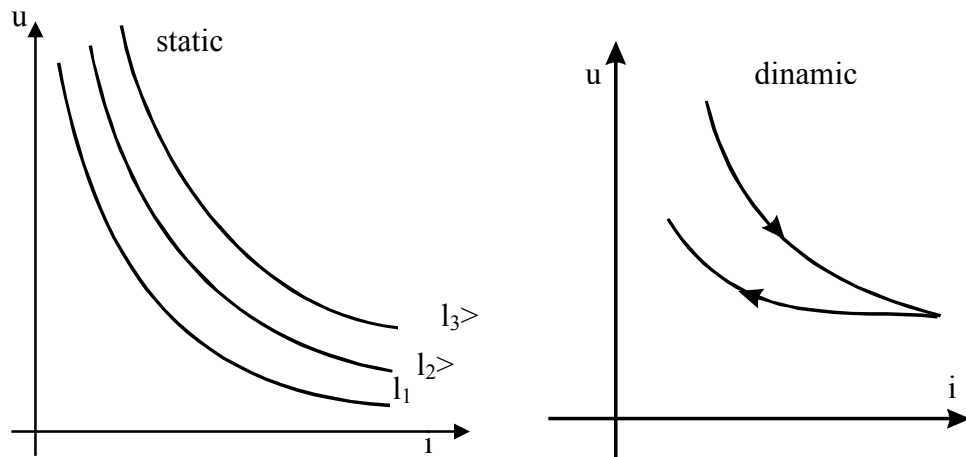
$$u_a = a + b \cdot l + \frac{c + d \cdot l}{i^n}, \text{ unde } n = 0,34 \dots 1,38$$

sau:

$$u_a = \alpha + \frac{(\beta + l) \cdot \gamma}{\left(\ln \frac{i}{\delta}\right)^3}$$

cu valorile $\alpha = 26V$, $\gamma = 5400V/cm$, $\delta = 7,4 \cdot 10^{-3}$, $\beta_{cu} = 1,3cm$, $\beta_{Ag} = 1,1cm$

Caracteristica arcului electric de curent continuu, în regim static, respectiv dinamic, pentru diverse lungimi ale arcului electric este prezentată în figura



Caracteristicile statice și dinamice ale arcului electric de curent continuu

Se constată că la aceeași valoare a curentului, tensiunea de arc crește pe măsură ce crește lungimea arcului electric, ceea ce face ca lungirea coloanei de arc electric să fie o măsură eficientă de stingere a arcului (la valori mari ale tensiunii arcului sursa de tensiune nu-i mai poate asigura puterea necesară și acesta se stinge).

2.2. Stabilitatea arcului electric de curent continuu

Să considerăm un circuit alimentat la tensiune continuă în care se dezvoltă un arc electric. În **regim static** de funcționare ecuația de tensiuni a circuitului este:

$$U = R \cdot i + u_a$$

Înlocuind expresia căderii de tensiune pe arc: $u_a = \alpha + \beta \cdot l$ se obține expresia lungimii maxime de ardere a arcului electric, dincolo de care arcul electric se stinge:

$$l_{\max} = \frac{U - \alpha}{\beta}$$

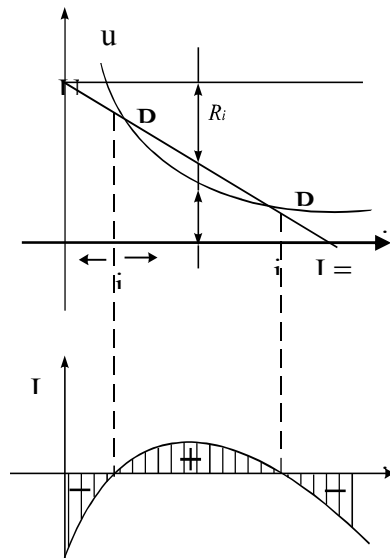
În **regim dinamic** de funcționare, de ex. la deconectare, ecuația de tensiuni a circuitului este:

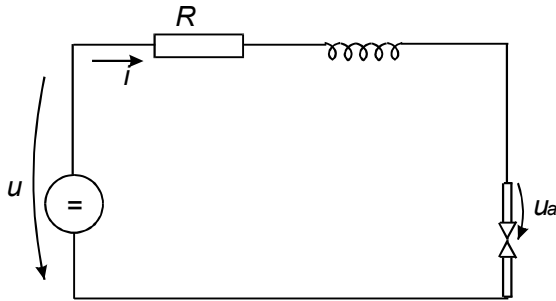
$$U = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} + u_a$$

Valoarea și semnul căderii de tensiune pe inductanța circuitului ne va permite să stabilim punctul de ardere **stabilă** a arcului electric respectiv **instabilă**.

$$L \cdot \frac{di}{dt} = U - R \cdot i - u_a$$

În figura de mai jos s-au reprezentat grafic caracteristica externă a sursei și variația tensiunii pe arc funcție de curent.





Analizând ce se întâmplă cu valoarea curentului la apariția unor perturbații în circuit se stabilește care este punctul de ardere stabilă respectiv instabilă a arcului electric.

$$\left\{ i < i_1, L \frac{di}{dt} < 0, i \downarrow \quad i > i_1, L \frac{di}{dt} > 0, i \uparrow \rightarrow P_1 \text{ este punct de ardere instabilă.} \right.$$

$$\left\{ i < i_2, L \frac{di}{dt} > 0, i \uparrow \quad i > i_2, L \frac{di}{dt} < 0, i \downarrow \rightarrow P_2 \text{ este punct de ardere stabilă.} \right.$$

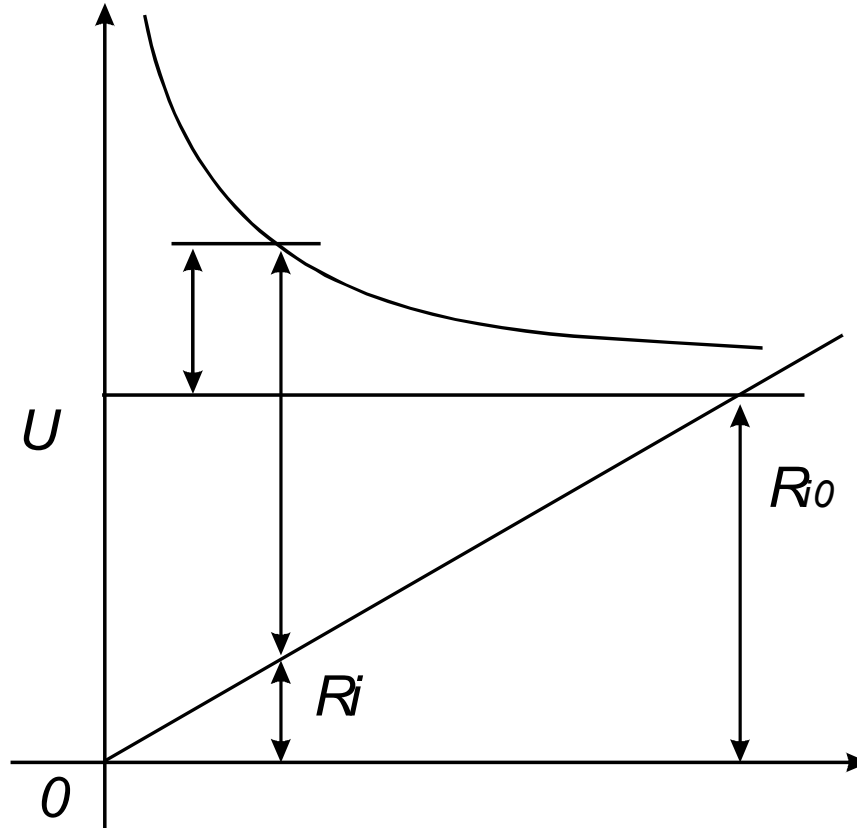
Pentru stingerea arcului electric de comutație este necesar aducerea parametrilor de ardere a arcului în punctul de ardere instabilă, caracterizat de curenți mici și tensiuni mari. La aplicațiile tehnologice ale arcului electric, cum ar fi sudura electrică sau tăierea, se urmărește asigurarea stabilității arderii arcului ceea ce implică, printre altele, o caracteristică externă căzătoare.

2.3. Durata arderii arcului electric

Pentru stingerea arcului electric și evaluarea efectelor termice ale acestuia se calculează durata acestuia, folosind ecuația de tensiuni dedusă din schema circuitului echivalent:

$$\Delta U = -L \cdot \frac{di}{dt} = R \cdot i + u_a + U$$

unde ΔU se numește **tensiunea de reducere** și pentru o inductivitate **L** definește **viteza de descreștere** di/dt a curentului către zero. Condiția necesară și suficientă ca arcul



electric să fie stins este ca $\Delta U > 0$, adică $di/dt < 0$.

Integrând după separarea variabilelor rezultă:

$$\int_0^{t_a} dt = -L \int_{I_0}^0 \frac{di}{\Delta U}$$

i_0 - valoarea curentului de regim permanent, înainte de separarea contactelor.

$$t_a = -\frac{L}{R \cdot I_0} \int_{I_0}^0 \frac{di \cdot R \cdot I_0}{\Delta U} = T \int_0^1 \frac{U}{\Delta U} d\left(\frac{i}{I_0}\right)$$

Se notează $\lambda = \int_0^1 \frac{U}{\Delta U} d\left(\frac{i}{I_0}\right)$

unde T este constanta electromagnetică de timp a circuitului. Se constată că durata de ardere a arcului electric depinde atât de caracteristicile echipamentului de comutație cât și de parametrii rețelei.

$$t_a = f(T, \lambda)$$

2.4. Energia arcului electric de curent continuu

Energia se calculează cu formula:

$$W_a = \int_0^{t_a} u_a \cdot i \cdot dt$$

$$u_a = U - R \cdot i - L \cdot \frac{di}{dt}$$

$$W_a = \int_0^t (U - R \cdot i) \cdot dt + \frac{L}{2} \cdot I_o^2$$

Înlocuind $dt = L \cdot \frac{di}{\Delta U}$ se obține:

$$W_a = L \cdot \int_{I_o}^0 \frac{u_a}{\Delta U} \cdot i \cdot di = L \cdot \frac{I_o^2}{2} \cdot \int_{I_o}^0 \frac{2 \cdot u_a}{\Delta U} \cdot \frac{i}{I_o} \cdot d\left(\frac{i}{I_o}\right)$$

Deci arcul electric își extrage energia din energia magnetică acumulată în inductivitatea rețelei. De aceea întreruperea circuitelor cu inductivitate mare, chiar la tensiuni mici, se face cu arc electric puternic, ceea ce produce supratensiuni. Acest proces are loc la întreruperea circuitelor de excitație a mașinilor electrice și la dezexcitarea rapidă a alternatoarelor. Apariția supratensiunilor de comutație se explică prin oscilații ale circuitului și transferul energiei acumulate în câmpul magnetic al inductivității L în câmpul electric al condensatoarelor.

O metodă simplă de reducere a supratensiunilor de comutație în înfășurările de curent continuu ale mașinilor electrice constă în **conectarea** în permanență a unei rezistențe în paralel pe înfășurare.

3. Arcul electric de curent alternativ

Întreruperea arcului electric de curent alternativ este facilitată de trecerea în mod natural a curentului prin zero, moment în care ionizarea în coloana arcului este minimă.

Deoarece un aparat de comutație este montat într-o rețea, întreruperea arcului electric în camera de stingere depinde de **parametrii rețelei** (curentul de scurtcircuit, tensiunea de restabilire) și de **parametrii aparatului**: tensiunea de ținere, tensiunea de arc.

Aspecte calitative

Fie u_s și I tensiunea sursei și curentul înainte de separarea contactelor. După o întrerupere reușită apare un **curent postarc** de aproximativ 10^4 ori mai mic decât amplitudinea curentului de scurtcircuit.

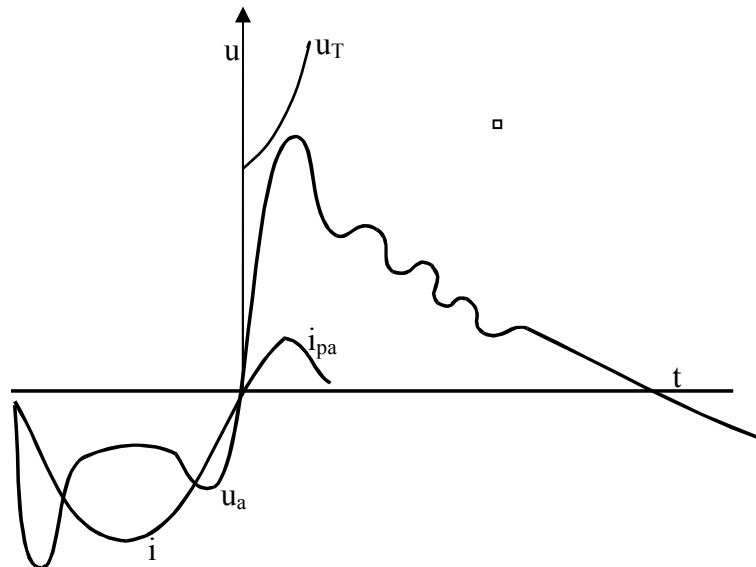
Există **două tipuri de corelări** de care depinde reușita unei deconectări:

1. Corelarea între tensiunea pe arc u_a și u_s

$u_a > u_s$ - întrerupere reușită;

$u_a < u_r$ - întrerupere nereușită și arcul se reaprinde.

2. Corelarea între tensiunea de restabilire u_r și tensiunea de ținere u_T



Tensiunea de ținere caracterizează fenomenul de restabilire a rigidității dielectrice a spațiului dintre contacte, după stingerea arcului electric. Rigiditatea dielectrică se reface progresiv, pe măsura deionizării spațiului dintre contacte din camera de stingere.

Dacă u_T nu crește suficient de rapid, pentru a fi în permanență mai mare decât tensiunea de restabilire, atunci este posibil să aibă loc reamorsarea arcului electric datorită străpunerii spațiului dintre contacte.

Energia arcului electric de curent alternativ se calculează:

$$W_a = \int_0^{T/2} (u_s - R \cdot i) \cdot i \cdot dt - L \cdot \int_0^{T/2} i \cdot di = \int_0^{T/2} u_s \cdot i \cdot dt - \int_0^{T/2} R \cdot i^2 \cdot di$$

Deci în momentul trecerii prin zero și energia acumulată în câmpul magnetic al rețelei este nulă. Dacă stingerea arcului electric de curent alternativ se produce cu smulgere de curent, apar supratensiuni importante, similar cu întreruperea curentului continuu.

Curentul postarc i_{pa} circulă imediat după trecerea prin zero a curentului de scurtcircuit, după o întrerupere reușită, sub acțiunea tensiunii oscilante de

restabilire și în prezența ionizării de rest (reziduale) a spațiului dintre contacte, caracterizat de o *conductanță de rest*.